

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Guzka

System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej

Recenzja została opracowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej.

Promotor rozprawy doktorskiej: **dr hab. inż. Wojciech Bujalski, prof. PW**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Konrad Wojdan**

Wstęp

Rozprawa mgr inż. Michała Guzka poświęcona jest zagadnieniu optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych, na przykładzie Warszawskiej, jednej z największych sieci ciepłowniczych w UE. Wagę zagadnienia potwierdza fakt, konieczności dekarbonizacji sieci ciepłowniczych, czego pierwszym etapem winny być prace nad zwiększeniem ich efektywności energetycznej.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 147 stron; składa się ze streszczeń (w języku polskim i angielskim) oraz 6 rozdziałów, w tym:

1. Wprowadzenie
2. Definicja zadania optymalizacyjnego
3. Model sieci ciepłowniczej
4. Implementacja systemu optymalizacyjnego
5. Testowanie optymalizatora i wyniki
6. Podsumowanie

Ponadto w Dodatku A opisano wkład autora oraz osób trzecich w stworzenie systemu optymalizacyjnego. Zgodnie deklaracją Doktoranta jego udział polegał na:

- stworzeniu modelu sieci ciepłowniczej;
- skonfigurowaniu ograniczeń i przeprowadzeniu symulacji w symulatorze hydraulicznym na potrzeby tworzenia modelu;
- stworzeniu i konfiguracji optymalizatora;
- przetestowaniu optymalizatora i udowodnieniu jego skuteczności jako autonomicznego elementu systemu;
- konfiguracji, przetestowaniu i udowodnieniu skuteczności optymalizatora jako integralnego elementu Systemu Wsparcia Decyzji;
- obliczeniu efektów ekonomicznych i stworzeniu szeregu innych wskaźników jakości;
- napisaniu ok. 15 000 linii kodu Python (ponad 90% kodu związanego z tworzeniem modelu sieci i testowaniem optymalizatora).

Wkładem osób trzecich w elementy będące dziełem autora:

- Dr inż. Konrad Wojdan, dyrektor działu badawczo-rozwojowego w firmie Transition-Technologies S.A. i Transition Technologies Science sp. z o.o., pełniąc jednocześnie rolę promotora pomocniczego koordynował prace nad tworzeniem optymalizatora i merytorycznie wspierał autora w zakresie modelowania i optymalizacji sieci ciepłowniczej.

- Dr inż. Michał Warchoń zaprogramował optymalizator w C++ oraz był autorem koncepcji algorytmu doboru źródeł szczytowych.
- Dr inż. Mariusz Kozakiewicz przygotował pierwszą, finalnie nieużywaną wersję modeli wyłącznie z użyciem technik uczenia maszynowego, które jednak stanowiły istotną wartość merytoryczną i punkt odniesienia dla Doktoranta.
- Dr inż. Teresa Kurek, mgr inż. Jakub Białek i mgr. inż. Artur Bielecki wspierali Doktoranta w niektórych pracach programistycznych przy tworzeniu modeli.
- Mgr. inż. Rafał Brzozowski oraz mgr inż. Rafał Serafin jako pracownicy Veolia Energia Warszawa stanowili wsparcie w zakresie poprawności merytorycznej i funkcjonalności biznesowych dostarczonego optymalizatora. Na dalszym etapie prac wsparcie to pochodziło również od Jakuba Sowy, Sylwii Kiebasz, Pawła Litmana.

Biorąc pod uwagę zakres wykonanych prac, udział Doktoranta w opracowaniu systemu optymalizacji sieci ciepłowniczej był istotny i wiodący, szczególnie w zakresie tworzenia modelu sieci ciepłowniczej oraz optymalizatora. Pomoc innych osób zaangażowanych w projekt była również ważna ale ograniczała się do konsultacji, wsparcie merytorycznego (szczególnie promotora pomocniczego) oraz programistycznego.

Na końcu dysertacji umieszczono Bibliografię.

II. Cel i teza rozprawy

Celem podstawowym rozprawy doktorskiej było opracowanie systemu optymalizującego pracę dużej, pierścieniowej sieci ciepłowniczej z punktu widzenia dystrybutora (a nie wytwórcy) ciepła; opracowany system stał się elementem składowym Systemu Wsparcia Decyzji.

Podstawowe założenia:

- System optymalizacyjny w założonym horyzoncie czasowym ustala optymalne wartości parametrów, na które ma wpływ dystrybutor ciepła.
- System kieruje się kryteriami ekonomicznymi, ustalając optymalne wartości parametrów.
- System optymalizacyjny wylicza rozwiązania bezpieczne, mogące zostać wdrożone z technicznego i prawnego punktu widzenia.

Dodatkowe założenia:

- System działa w sposób zintegrowany z Systemem Wsparcia Decyzji, który jest źródłem i odbiorcą danych.
- Odpowiednio krótki czas obliczeń umożliwia dyspozytorowi interaktywne wykorzystanie Systemu Optymalizacyjnego (tj. sprawdzenie kilku scenariuszy po otrzymaniu kompletu prognoz – o godz. 6:00, a przed rozpoczęciem doby ciepłowniczej – godz. 10:00).

Ponieważ rozprawa powstała w ramach doktoratu wdrożeniowego, unikalna wartość naukowa tej rozprawy jest z punktu widzenia wdrożenia elementem dodatkowym. Podstawowym zadaniem w trakcie rzeczywistego wdrożenia było zbudowanie funkcjonalnego systemu informatycznego.

Celem pobocznym niniejszej rozprawy jest udokumentowanie przeprowadzonych prac i przedstawienie kompletnej metodologii budowy systemu optymalizującego sieć ciepłowniczą, tj. opisanie procesu w taki sposób, który umożliwi jego odtworzenie.

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, a zawarty w recenzowanej rozprawie doktorskiej materiał badawczy w postaci kompleksowo przeprowadzonych badań i analiz w pełni odpowiada sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy.

Sformułowano tezę o możliwości stworzenia systemu optymalizującego dużą, pierścieniową sieć ciepłowniczą, który bez modelu fizykalnego sieci i przy zastosowaniu ogólnodostępnych maszyn obliczeniowych będzie mógł wyliczyć optymalne parametry zadane na horyzoncie 48 godzin, podczas gdy czas obliczeń w najbardziej skomplikowanych przypadkach nie przekroczy jednej godziny, a dokładność obliczeń będzie na tyle wysoka, że jej zwiększenie nie spowodowałoby istotnego polepszenia wartości biznesowej Systemu (tj. użyteczności systemu dla poprawy pracy sieci z punktu widzenia jej właściciela).

Można dyskutować o zasadności budowania systemu który nie uwzględnia modelu fizykalnego (struktury) sieci, który nie korzysta z aktualnych danych pomiarowych a jedynie z danych historycznych.

III. Treść rozprawy

W **Streszczeniach** w języku polskim i angielskim, Autor omawia zakres pracy oraz uzyskane wyniki.

W Rozdziale 1. **Wprowadzenie**, Doktorant omawia przedmiot Dysertacji, w tym omawia sektor ciepłowniczy w Polsce oraz Warszawską Sieć ciepłowniczą, składającą się z 1800 km ciepłociągów i ok. 10 300 węzłów cieplnych dostarczających ciepło do 19000 obiektów. Sieć zasilają 4 źródła: Elektrociepłownia Siekierki o mocy cieplnej 2078 MW i elektrycznej 1015 MW, Elektrociepłownia Żerań o mocy cieplnej 1580 MW i elektrycznej 386 MW, Ciepłownia Kawęczyn – 465 MW (szczytowa), Ciepłownia Wola – 465 MW (szczytowa).

W podrozdziale 1.1 omówiono cele pracy oraz podstawowe założenia modelu. W podrozdziale 1.2 przedstawiono tezę pracy. W podrozdziale 1.3 Autor omawia układ pracy.

Stan badań w zakresie optymalizacji pracy systemów ciepłowniczych na podstawie przeglądu literatury przedstawiono w podrozdziale 1.4. Zwrócono uwagę na znaczenie obniżenia temperatury zasilania w pracach optymalizacyjnych oraz problemy z *Legionellą*, które mogą występować przy ograniczaniu temperatury. Autor zwraca uwagę na aspekty oddziaływań sieć - budynki, których zapotrzebowanie na ciepło maleje. Następnie przechodzi do omówienia metod optymalizacji, w tym zastosowania optymalizacji genetycznej dla doboru średnic i ułożenia sieci rurociągów, grubości izolacji i jej rodzaju, dla systemu z centralną ciepłownią i zdecentralizowanymi źródłami ciepła, czy połączonego systemu chłodzenia i ogrzewania. Sporo uwagi poświęca metodom opartym o Mixed Integer Linear Programing, programowi Termis czy optymalizacji statycznej tabeli regulacyjnej systemu. Wnioskiem Autora jest, że żadne z opublikowanych dotychczas rozwiązań nie jest w stanie wypełnić postawionego w pracy zadania. Na zakończenie rozdziału Autor stwierdza, że przedstawione w rozprawie rozwiązanie jest nowatorskie (unikalne na skalę światową), m.in. ze względu na wykorzystanie do stworzenia modelu sieci nowatorskiej metod uczenia maszynowego, niespotykany algorytm doboru źródeł ciepła oraz proces optymalizacji pracy sieci w horyzoncie czasowym umożliwiającym zaplanowanie pracy źródeł ciepła.

Rozdział 2 zatytułowano **Definicja zadania optymalizacyjnego**. Zdaniem Doktoranta wstępem do zdefiniowania zadania optymalizacyjnego jest rozpoznanie potrzeb użytkownika, zdefiniowanie funkcji celu, ograniczeń i zmiennych decyzyjnych.

W podrozdziale **2.1. Rozpoznanie potrzeb użytkownika** Autor omówił zagadnienia, które należy rozważyć przystępując do prac optymalizacyjnych, w tym odnośnie oczekiwań operatora sieci ciepłowniczej, sposobu sterowania elementami sieci, horyzontu czasowego

optymalizacji, dodatkowych funkcjonalności systemu, szybkości rozbudowy/modernizacji sieci, dostępności danych o systemie, celu optymalizacji (np. zmniejszenie strat ciepła, zmniejszenie zużycia paliwa, zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, etc.). W przypadku sieci Warszawskiej, ze względu na długi czas reakcji wybrano horyzont czasowy 48 i 120 h.

2.2. Algorytm procesu optymalizacyjnego

Główne trudności w rozwiązywaniu zadań optymalizacyjnych to wielkość przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych, nieciągłość przestrzeni rozwiązań, nieliniowości, skomplikowane ograniczenia (nie wypukłe, nieliniowe), całkowitoliczbowe zmienne decyzyjne. W związku z występowaniem wszystkich tych problemów w postawionym zadaniu, aby ograniczyć czas obliczeń i umożliwić wykorzystanie systemu optymalizacyjnego jako element systemu wsparcia decyzji dyspozytorowi sieci, zachodziła konieczność zastosowania szeregu uproszczeń.

Zdecydowano się podzielić zadanie optymalizacyjne na dwa etapy:

- *optymalizator bazowy*, bez zmiennych całkowitoliczbowych, rozwiązuje zadanie optymalizacji dla ustalonego w każdej godzinie horyzontu optymalizacji zestawu pracujących źródeł ciepła;
- algorytm optymalnego doboru pracujących źródeł (nadrzędna warstwa optymalizacji).

Umożliwia to podział zagadnienia optymalizacji na części – jedno bez zmiennych całkowitoliczbowych, a inne z takimi zmiennymi. Optymalizator bazowy rozwiązuje zadanie optymalizacji dla z góry zadanej konfiguracji źródeł ciepła. Zdecydowano, że będzie to zadanie klasy programowania kwadratowego, tj. z kwadratowym wskaźnikiem jakości, kwadratowymi ograniczeniami i ciągłymi zmiennymi decyzyjnymi. Jako ‘solver’ do jego rozwiązania wybrano bibliotekę IPOPT (Interior Point OPTimizer).

W podrozdziale 2.3. przedstawiono **Spis ważniejszych skrótów i oznaczeń w opisie zadania optymalizacyjnego.**

Podrozdział 2.4. **Optymalizator bazowy: Wybór zmiennych decyzyjnych i definicje ograniczeń** poświęcono doborowi zmiennych decyzyjnych takich jak: temperatury i ciśnienia zasilania w źródłach oraz zmiany ciśnienia wody zasilającej i powrotnej w przepompowniach. Wybór ten Autor uzasadnił możliwością decydowania o tych parametrach przez dyspozytora sieci, dla którego optymalizator ma być pomocą.

Dodatkowo Doktorant sformułował i zaimplementował w programie szereg ograniczeń (dla ciśnień zasilania i powrotu, przepływu medium, mocy dyspozycyjnej i zamówionej, etc.), pozwalających użytkownikowi kształtować wyniki optymalizacji w sposób, umożliwiający realizację ograniczeń biznesowych, limitów technicznych, kontraktowych i innych. Przy czym uwzględniono, że ze względu na znaczne opóźnienia transportowe, zwykle nie ma możliwości wpływu na parametry całej sieci ciepłowniczej w jednym momencie. Wykorzystywano jedynie takie ograniczenia, na które jakakolwiek zmienna decyzyjna procesu optymalizacji może mieć wpływ.

W podrozdziale 2.5. **Opt. Bazowy: Definicja funkcji celu i ograniczenia miękkie** omówiono takie zagadnienia jak funkcja celu uwzględniająca cel ekonomiczny optymalizacji, w tym koszty ciepła i zużytej w przepompowniach energii elektrycznej, koszty przygotowania i podgrzania wody uzupełniającej. W celu racjonalizacji wyników optymalizacji oraz uzyskania wyników bliższych intencji użytkownika wprowadzono do algorytmu system narzucanych ‘kar’ (np. za podniesienie temperatury lub ciśnienia wody zasilającej) jako tzw. ograniczenia miękkie, które dyspozytor może dodać do funkcji celu.

Podrozdział 2.6. **Warstwa nadrzędna: dobór źródeł szczytowych** opisuje, w jaki sposób dokonywany jest wybór zestawu pracujących źródeł. W tym celu opracowano szereg zasad, które określają zasady uruchomienia i odstawienia źródeł, w tym uwzględniono, że

- od chwili podjęcia decyzji o uruchomieniu do momentu, w którym źródło może dostarczać ciepło do sieci musi minąć pewien okres czasu;
- źródła mogą mieć różny czas uruchamiania;
- procedurę uruchamiania źródła można przerwać lub dowolnie opóźnić;
- czas odstawiania źródła wynosi zero;
- niektóre źródła (kogeneracyjne) pracują cały czas, a inne (szczytowe) są uruchamiane i odstawiane na wniosek optymalizatora;
- odstawianie źródeł szczytowych zachodzi w odwrotnej kolejności niż uruchamianie;
- operator może wymusić pracę pewnego źródła szczytowego w wybranych przez siebie godzinach;
- uruchamianie źródła jest procesem kosztownym.

W rozdziale 3 **Model sieci ciepłowniczej**, modelem określono serię zależności pomiędzy zmiennymi decyzyjnymi a innymi parametrami, które podlegają ograniczeniom.

W podrozdziale 3.1 omówiono **Cechy budowanego modelu**. Najważniejszą cechą budowanego przez Doktoranta modelu było wykorzystanie danych historycznych i metod nauki o danych (ang. data science), zamiast podejścia polegającego na wyjściu od równań opisujących prawa fizyki (spadków ciśnienia, wymiany ciepła, praw Kirchhoffa). Modele odzwierciedlały parametry w wybranych punktach sieci, bezpośrednio na podstawie wejść do modelu, pomijając topologię sieci i jej parametry fizyczne (średnice, długości rurociągów itp.). W celu doboru współczynników dla w/w modeli Doktorant posługiwał się metodą regresji grzbietowej (Ridge regression).

Wielkości wyliczone przez model to przepływ w źródłach ciepła, temperatura wody powrotnej w ciepłowniach, ciśnienie wody powrotnej w ciepłowniach, przepływ wody uzupełniającej sieć ciepłowniczą, etc. Oznacza to, że nawet w przypadku bardzo prostej sieci ciepłowniczej z jednym źródłem ciepła i kilkoma węzłami, trzeba stworzyć model, względnie kilkanaście niezależnych modeli. W przypadku ogromnej sieci ciepłowniczej mogą to być setki tysięcy indywidualnych modeli. Stąd Doktorant zredukował ilość punktów, dla których wyznaczano te wielkości do około 50 węzłów i 20 komór, które nazwano węzłami krytycznymi i komorami krytycznymi i tylko je rozpatrywano w procesie optymalizacji. Brano też pod uwagę wszystkie źródła ciepła i trzy przepompownie. Ich wybór uwzględnił, m.in. równomierne pokrycie całego obszaru sieci oraz obiekty zarówno z niskim, jak i wysokim opóźnieniem transportowym. Na ograniczenie wyboru wpływał fakt, że tylko niewielka część z komór i węzłów cieplnych jest wyposażona w telemetrię umożliwiającą odczyt danych o temperaturach, ciśnieniach, w czasie bliskim rzeczywistemu. Uwzględniano również konieczność zapewnienia równowagi hydraulicznej źródeł ciepła jak i przepompowni. Następnie określono **zmienne wejściowe do modelu**: zapotrzebowanie na ciepło i dane pogodowe oraz wybrano około 20 kluczowych armatur, które mogą być otwarte lub zamknięte niezależnie od sezonu i zestawu pracujących źródeł.

W podrozdziale 3.2. **Źródła danych do tworzenia modeli** omówiono podstawowe źródło danych – dostępne dane historyczne w postaci szeregów czasowych (z rozdzielczością godzinową) zarchiwizowanych w systemie PI Osisoft. Ze względu na aktualność autor uwzględnił trzyletnią historię.

W podrozdziale 3.3. **Agregacja i walidacja danych** Doktorant opisał metodę walidacji polegającej na odfiltrowaniu danych przekraczających ustalone przez autora wartości progowe – tzn. dane dotyczące pracy nieprawidłowej (awarie sieci); te które nie zostały wychwycone przez opracowany algorytm, autor usunął ręcznie.

W podrozdziale 3.4. **Automatyczna generacja modelu wyłącznie z danych historycznych – skrypty w R** Doktorant uzasadnia odrzucenie tej metody nie fizycznością wyników.

Podrozdział 3.5. **Struktura finalnych modeli** poświęcono opisowi procesu tworzenia modeli, składającego się z wielu iteracji. Finalnie dla większości modeli, jako źródłem danych bez zakłóceń, autor posiłkował się eksperymentami za pomocą symulatora hydraulicznego Termis, gdzie na podstawie kilku punktów danych można zbudować model. Następnie wykonane na podstawie tych danych modele były poprawiane poprzez dopasowanie ich elementów do danych historycznych.

W podrozdziale 3.6. **Przygotowanie wstępne modeli Termis** opisano modele zbudowane w oparciu o program Termis w wersji 7.2. Podstawowe modele, które były możliwe do wykorzystania to:

- Model magistralny (pomijający sieć rozdzielczą),
- Model uproszczony (pośredni, pomijający część sieci rozdzielczej),
- Modele bazowy (zawierający wszystkie odcinki sieci i wszystkie armatury będące w ewidencji).

Obliczenia prowadzono głównie w modelu uproszczonym. Na tej podstawie uzyskano informacje, które z węzłów zawsze są zasilane z tego samego źródła ciepła, a dla których źródło ciepła może się zmieniać wraz ze zmianą warunków ruchowych. Uzyskane informacje mogą być wykorzystane przy tworzeniu modeli:

- temperatur zasilania w węzłach,
- przepływów w węzłach i źródłach,
- temperatury powrotu z węzłów,
- temperatury powrotu w źródłach.

W podrozdziale 3.7. **Model przepływu w źródłach i w przepompowniach cz. 1** opisano iteracyjną metodę generowania modeli sieci ciepłowniczej z wykorzystaniem program Termis oraz danych historycznych.

W podrozdziale 3.8. **Model przepływu w źródłach i w przepompowniach cz. 2.** opisano korektę modelu na przepływ z wykorzystaniem danych historycznych. Wyniki symulatora hydraulicznego nie są w pełni zgodne z rzeczywistością, toteż mimo że część modeli powstało na podstawie eksperymentów z wykorzystaniem systemu Termis, zmniejszono ich błąd względem rzeczywistości, korygując je przy użyciu danych pomiarowych.

W podrozdziale 3.9. **Model ciśnienia zasilania w węzłach krytycznych, komorach krytycznych i przepompowniach** przeprowadzono analizę danych wejściowych i zdecydowano (dla ograniczenia czasu obliczeń) o ograniczeniu zmiennych wejściowych do modelu, uwzględniając: sumaryczny przepływ ze źródeł równy sumarycznemu przepływowi w węzłach odbiorców, ciśnienie zasilania w każdym ze źródeł, przyrost ciśnienia w przepompowniach po stronie zasilającej oraz stan armatury. Ze względu na wymagania modelu przeprowadzono linearyzację ciśnienia zasilania, dla każdego z sezonów w innym przedziale przepływów.

W dalszych podrozdziałach opisano: 3.10 - **Model ciśnienia powrotu**, 3.11. **Model temperatury zasilania i przepływu w węzłach**, 3.12. **Inne modele** (w tym temperatury powrotu).

W podrozdziale 3.13 **Podsumowanie** omówiono wejścia do modelu, w sumie 215 wielkości (takich jak zapotrzebowanie na ciepło w różnych potęgach, zmienne decyzyjne (dla temperatur z różnymi opóźnieniami), enkodowanie godziny zegarowej, stopień otwarcia

różnych armatur). Wśród współczynników modelu, najliczniejsze są te związane z zapotrzebowaniem na ciepło (w 86% modeli), a dalej współczynniki od nieopóźnionego ciśnienia zasilania źródła nr 2 (ok. 26% modeli) i wysokości podnoszenia w przepompowniach (ok. 25% modeli). W sumie model sieci to około 20 000 współczynników.

W podrozdziale **3.14. Prognoza zapotrzebowania na ciepło** Doktorant omawia moduł, który był przedmiotem rozprawy doktorskiej Teresy Kurek.

Rozdział 4 **Implementacja systemu optymalizacyjnego** omawia funkcjonalności programu Optymalizator, który został napisany w języku C++ i dostarczony do użytkowania w postaci pliku wykonywalnego .exe. Optymalizator wymienia dane za pośrednictwem plikowej bazy danych SQLite.

Zaimplementowany optymalizator to około 1000 zmiennych decyzyjnych, 20000 ograniczeń, 2000 indywidualnych modeli sieci ciepłowniczej. Sieć w której pracuje, posiada:

- 2 ciepłownie kogeneracyjne pracujące przez cały rok oraz dwie ciepłownie szczytowe,
- ponad 10300 węzłów cieplnych,
- 3 przepompownie po stronie zasilającej i powrotnej sieci,
- kilkadziesiąt pierścieni w sieci.

Optymalizator zainstalowany na komputerze Intel Xeon E5-2680, 32 GB RAM potrzebuje od 3 (zwykle około 5) do 30 minut (rośnie w przypadku dużej zmienności pogody), aby znaleźć optymalne rozwiązanie – co stanowi potwierdzenie tezy Doktoranta.

W rozdział 5 **Testowanie optymalizatora i wyniki** przedstawiono metodologię i wyniki testowania systemu optymalizacji sieci ciepłowniczej. W celu ograniczenia czasu testowania wykorzystano dostępne dane historyczne, ograniczając je do okresów pracy sieci w warunkach pogodowych w dużej różnorodności, w tym w okresie:

- zimowym z pracującymi 2 źródłami szczytowymi;
- zimowym z pracującym 1 źródłem szczytowym;
- zimowym bez pracujących źródeł szczytowych;
- przejściowym (bez pracujących źródeł szczytowych);
- letnim.

Kolejnym kryterium poprawności optymalizacji jest uzyskanie wyników podobnych do decyzji podejmowanych przez dyspozytora sieci (sieć pod okiem i na podstawie decyzji dyspozytora zazwyczaj działa prawidłowo). Wyniki pracy optymalizatora porównywano również z wynikami innego, sprawdzonego wcześniej modelu/symulatora. Wykazano, że praktycznie w każdym z testowanych scenariuszy wyniki z modelu, wykorzystywanego przez optymalizator i symulator hydrauliczny są podobne.

W ponad dwuletnim okresie badań optymalizatora wygenerowano około 20 000 scenariuszy. Generowano wyniki w paczkach po ok. 54 scenariusze (18 dat, po trzy warianty z horyzontem 48h, a czasem 120h). Każdy ze scenariuszy takiej paczki podlegał analizie przez autora pracy, a następnie dyskusji z analitykami pracującymi na co dzień z siecią ciepłowniczą. W sumie w trakcie kolejnych iteracji, dyskusji, wdrażania poprawek i generowania kolejnych scenariuszy do oceny przez autora i następnie konsultacji zewnętrznych wygenerowano ok. 60 paczek po ok. 54 scenariusze (dodatkowe paczki generowano czasem iteracyjnie, by zapoznać się z efektami zmian, lub by przetestować małe zmiany).

Podstawowym kryterium poprawności było spełnienie wszystkich ograniczeń oraz wymagania funkcji celu – minimum kosztów. Rozwiązania niedopuszczalne (przekraczające ograniczenia) były analizowane pod kątem, czy przy niewielkiej, dopuszczalnej technicznie modyfikacji parametrów pracy źródeł i przepompowni, dałoby się uzyskać scenariusz spełniający ograniczenia. Analiza taka miała na celu sprawdzenie, czy wartości ograniczeń oraz model są prawidłowe. Ponadto, w oparciu o wiedzę ekspercką dyspozytorów sieci ustalono szereg

dotychczasowych (subiektywnych) kryteriów odnośnie dołączonych źródeł ciepła, historycznie obserwowanych mocy, przepływów, temperatur i ciśnień zasilania, etc.

Obserwując przebiegi parametrów źródeł szczytowych, zaobserwowano np., że

- optymalizator znajduje rozwiązania tańsze, ze skróceniem czasu pracy źródeł szczytowych;
- dzięki wzrostowi temperatury zasilania nad ranem uniknięto piku przepływu, który w tym momencie wstąpił w rzeczywistości.

Sezon przejściowy stanowi największe wyzwanie w planowaniu pracy sieci. Newralgicznym momentem jest przejście temperatury zewnętrznej przez punkt, w którym uruchamia się centralne ogrzewanie. W rzeczywistości w tym przypadku wzrost zapotrzebowania na ciepło był szybszy, niż przewidywała to prognoza. Rodzi się wątpliwość, czy scenariusz taki można bezpiecznie zrealizować.

Podsumowując, wg opinii analityków pracujących na co dzień z systemem ciepłowniczym i pośrednio odpowiadających za jego bezpieczeństwo, **83%** generowanych scenariuszy (z paczki 54 scenariuszy dla różnych sezonów) jest możliwych do wdrożenia. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia możliwości wdrożenia wyników prac. Ponadto, potwierdzono zasadność implementacji dużej liczby ograniczeń - są one wykorzystywane w obliczeniach. Na kształt wyników wpływają ograniczenia inne niż godzinowe. Takich ograniczeń aktywowanych w scenariuszach jest ok. 60.

Różnica strat ciepła wyliczonych przez optymalizator na podstawie mocy źródeł ze scenariusza i prognozowanego zapotrzebowania na ciepło przez odbiorców, a strat ciepła oszacowanych przez model partnera zawierający topologię całej sieci wynosiła średnio:

- -0.50 pkt. proc. dla scenariuszy „optymalnych”,
- -0.55 pkt. proc. dla scenariuszy „bezpiecznych”,
- -0.32 pkt. proc. dla scenariuszy „technicznych”.

Jednym z głównych objawów pracy optymalizatora są zazwyczaj modyfikacje temperatury wody zasilającej podawanej przez źródła. Dla badanego okresu letniego należy jednak je za losowe. W sezonie przejściowym z ograniczeniami miękkimi proponowane są zwykle scenariusze z obniżoną o około 2-3°C temperaturą zasilania co mogło wynikać z tendencji dyspozytorów, by ze względów bezpieczeństwa podwyższać temperaturę. W sezonie zimowym temperatura czasem rośnie, czasem maleje, gdyż celem optymalizacji jest głównie skrócenie czasu działania źródeł szczytowych (droższych i mniej efektywnych), co czasem oznacza podniesienie temperatury zasilania w źródłach podstawowych. Stąd, kolejnym z zauważalnych efektów pracy optymalizatora jest skrócenie czasu działania szczytowych źródeł ciepła.

Ponadto, scenariusze optymalizacyjne charakteryzują się zwykle zwiększaniem czasu pracy i wysokości podnoszenia ciśnienia w przepompowni. Z tego wynika, że w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej przy wysokich obciążeniach sieci, optymalnym z punktu widzenia przyjętych założeń jest skracanie czasu prac źródeł szczytowych, kosztem zwiększenia nakładów na eksploatację przepompowni i czasem, podniesienia temperatury zasilania.

Rozdział 6 **Podsumowanie** poświęcono omówieniu wyników badań i **wnioskom**. **Stwierdzono, że** w rozprawie zaprezentowano nowatorskie rozwiązanie dla optymalizacji pracy dużej sieci ciepłowniczej. Rozdział podsumowano opisem oryginalności badań oraz wnioskami dla przyszłych modyfikacji, rozbudowy, czy odtworzenia zaprezentowanych badań.

Bibliografia zawiera 74 pozycji w tym ok. 55 z okresu ostatnich 10 lat.

IV. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalny przyczynek do badań i rozwoju technologii związanych z optymalizacją pracy sieci ciepłowniczej dużych rozmiarów. Biorąc pod uwagę przedmiotową literaturę naukową, rozwiązanie opisywane w doktoracie jest oryginalne naukowo ze względu na:

- użycie nowatorskiej metod uczenia maszynowego do stworzenia modelu sieci;
- oryginalny algorytm doboru źródeł ciepła;
- optymalizację pracy sieci w horyzoncie czasowym umożliwiającym zaplanowanie pracy źródeł ciepła, przy jednoczesnym uwzględnieniu rzeczywistych zmierzonych parametrów pracy sieci przed momentem startu optymalizacji;
- optymalizację dużego systemu ciepłowniczego o opóźnieniach transportowych sięgających 24 godzin i pierścieniowym układzie sieci (kilkadziesiąt pierścieni) i ponad 10300 węzłów cieplnych).

Ponadto na tle rozwiązań literaturowych wyróżnia się nie tylko teoretycznym potwierdzeniem poprawności i skuteczności rozwiązania, lecz także jego wdrożeniem w rzeczywistej działalności biznesowej przedsiębiorstwa.

V. Wartości poznawcze pracy

Wartość poznawcza recenzowanej rozprawy polega na pozytywnym zweryfikowaniu tezy pracy. Zoptymalizowano pracę dużej sieci (o znacznych opóźnieniach transportowych i układzie pierścieniowym i ponad 10 300 węzłów cieplnych) w horyzoncie czasowym umożliwiającym zaplanowanie pracy źródeł ciepła przy jednoczesnym uwzględnieniu rzeczywistych zmierzonych parametrów pracy sieci przed momentem startu optymalizacji. Stworzono i zweryfikowano innowacyjny algorytm doboru źródeł ciepła, implementujący metody uczenia maszynowego do stworzenia modelu sieci. Zaproponowano zakres przyszłych badań, w tym:

- wprowadzenie równoległych obliczeń optymalizacji bazowych w celu ograniczenia czasu symulacji (szczególnie w przypadku większej ilości źródeł);
- opracowanie nowych metod uwzględnienia oddziaływania armatury na parametry pracy sieci;
- sprawdzenie możliwości budowy modelu przy użyciu wyłącznie danych historycznych, bez korzystania z symulatora sieci do wygenerowania dodatkowych danych.

Moim zdaniem zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych.

VI. Wartości użytkowe pracy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający z aktualności poruszanych zagadnień. Zoptymalizowano pracę dużej sieci (o znacznych opóźnieniach transportowych i układzie pierścieniowym oraz tysiącach węzłów cieplnych) w horyzoncie czasowym umożliwiającym zaplanowanie pracy źródeł ciepła przy jednoczesnym uwzględnieniu rzeczywistych zmierzonych parametrów pracy sieci przed momentem startu optymalizacji. System działa w sposób zintegrowany z Systemem Wsparcia Decyzji, 83% generowanych scenariuszy wg dyspozytorów nadaje się do realizacji. Potwierdzono, że obliczony bilans strat ciepła zgadza się z danymi pomiarowymi. Wynikiem symulacji jest skrócenie czasu pracy kosztownych źródeł szczytowych oraz wydłużenie pracy przepompowni.

Dzięki powyższym działaniom ograniczono straty ciepła przynajmniej o 123 TJ rocznie i emisję CO₂ o 14 495 ton rocznie.

Podsumowując, pragnę jeszcze raz podkreślić aktualność oraz dużą wartość użyteczną przeprowadzonych badań.

VII. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VII.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia co stanowi niewątpliwie osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne:

1. W systemie optymalizacji nie uwzględniono rzeczywistej struktury sieci ze względu na jej wielkość (ponad 10000 węzłów); zamiast tego wykorzystano 2000 jej modeli opartych (dla różnych parametrów) o historyczne dane pomiarowe. Biorąc pod uwagę te liczby, czy rzeczywiście upraszcza to zagadnienie optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej?
2. Czy wykorzystanie danych aktualnych z węzłów sieci nie poprawiłoby jakości predykcji stanu oraz procesu optymalizacji sieci?
3. Jaki wpływ na predykcję ma wadliwa prognoza pogody ?
4. Proces optymalizacji wykorzystuje 215 danych wejściowych – czyni to proces optymalizacji dość skomplikowanym; czy wszystkie dane były równie istotne i konieczne ?
5. Czy system optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej umożliwia jej diagnostykę, pod względem poprawności jej funkcjonowania?

Uwagi drobniejsze:

1. Choć język rozprawy jest generalnie dość poprawny występują drobne błędy lub nieprecyzyjne stwierdzenia:
 - Str. 42 - Dodania ograniczeń miękkich;
 - Str. 58 - **Zmienna decyzyjne** to oczywisty kandydat;
 - Str. 62 - autor usunął rękopis;
 - Str. 65 - Modele bazowy;
 - Str. 69 - Najpierw zadano na wejściu „typowe” przepływy i sprawdzić, jakie Termis obliczy ciśnienia zasilania;
 - Str. 70, 71 – brak jednostek na rys. 7 i 8
 - Str. 72 - przepływy w źródłachm
 - Str. 75 - zmiana temperatury oddziałuje na przepływ z opóźnieniem – czasem dotarcia do węzłów przez wodę o nowej temperaturze, których regulatory zareagują, korygując przepływy
 - Str. 75 Doboru opóźnień dokonano na podstawie **danych rzeczywistych**, a nie eksperymentalnych.
 - Str. 81 Następnie sprawdzono jeszcze, czy zmiana opóźnienia transportowego nie wpłynęłaby na poprawę wskaźników modelu – **nie**.
 - Str. 84 po stornie zasilającej,
 - Str. 87 – opis osi na Rys. 16 – „Wartość członu od ciśnienia” – co to za wielkość, wymiar ?
 - Str. 112 - Np. na Rys. 21 widać, że przepływy w źródle w pierwszej dobie wyłuszcza się dla wartości ok. 0.77
 - Str. 126 - dla kilku niektórych opóźnień.

VII. 2. Uwagi porządkowe

Rozprawa doktorska przygotowana jest dość starannie pod względem edytorskim i językowym. Struktura i plan pracy są poprawne choć generalnie opisy wykresów są niekompletne, brak jednostek, etc.

VIII. Uwagi końcowe

Praca napisana jest w sposób zrozumiały, zamieszczono w niej wiele szczegółowych informacji pozwalających na dokładne przeanalizowanie materiału badawczego. Powyższe uwagi krytyczne mają na celu jedynie pomoc w wykorzystaniu przedstawionego materiału dla dalszych prac nad zagadnieniem optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych.

Na **liście osiągnięć Doktoranta** na szczególną uwagę zasługuje bogate doświadczenie projektowe (Projekt „Inteligentna Sieć Ciepłownicza” Veolia - Energia dla Warszawy sp. z o.o., Projekt Bloki 200+, Projekt Optymalizacji sieci chłodu w Katarze oraz optymalizacji planu pracy Polimery Police) i zawodowe (praca w firmie Transition Technologies a obecnie Centrum Analityki KGHM sp. z o.o., jako Chief Innovation Officer).

IX. Wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa „System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej” jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod numerycznych. Na szczególne wyróżnienie zasługuje oryginalne opracowanie innowacyjnego systemu optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej.

Podsumowując, wysoko oceniam dorobek Doktoranta w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz pokazuje, że kandydat posiada dużą wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie **inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**. Potwierdza, że Doktorant posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Michała Guzka** „System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2020 r., poz. 85) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony



